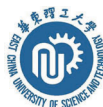
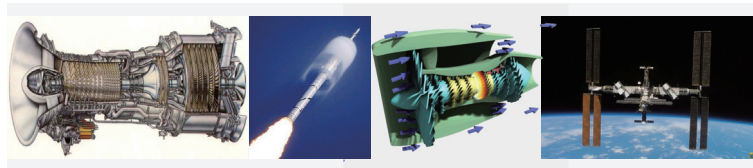


## 第4章 气体的热力过程



机械与动力工程学院  
曹 军  
2020年10月



## 内容

4-1 理想气体的基本热力过程

4-2 气体热力过程的功及热量

4-3 压气机的热力过程

4-4 湿空气的热力过程



## 热工基础 之 工程热力学

4-1

## 理想气体的基本热力过程



## 需要分析的量

状态

$p$   $v$   $t$   $u$   $h$   $s$

过程

$\Delta u$   $\Delta h$   $\Delta s$   $w$   $w_t$   $q$



## 热力过程

能量转换的基本途径



工质的状态变化过程



## 基本热力过程(Fundamental thermodynamic process)

基本  
热力过程

定容过程 — 气缸中汽油的燃烧

定压过程 — 蒸发器中制冷工质的汽化

定温过程 — 冷凝器内乏汽的凝结

绝热过程 — 蒸汽流过汽轮机做功

◆ 四种典型的可逆基本热力过程是热力设备设计计算的基础和依据。



## 研究热力过程的目的、方法

### 目的

- 以热力学第一定律为基础，理想气体为工质；
- 分析可逆的基本热力过程中能量转换、传递关系；
- 揭示过程中工质状态参数的变化规律及热量和功量的计算。

### 方法和手段

- 求出过程方程及计算各过程初终态参数。
- 根据第一定律及理想气体性质计算过程中功和热。
- 画出过程的  $p-v$  图及  $T-s$  图，帮助直观分析参数间关系及能量关系。



## 多变指数

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n \Rightarrow \ln p_1 + n \ln v_1 = \ln p_2 + n \ln v_2$$

$$n = \frac{\ln p_2 - \ln p_1}{\ln v_2 - \ln v_1} = \frac{\ln(p_2 / p_1)}{\ln(v_2 / v_1)}$$



## 在 $p-v$ 图及 $T-s$ 图上的表示-多变过程线

- ◆ 只要求得  $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n$  及  $\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n$  (斜率)，即可在  $p-v$  图及  $T-s$  图上画出多变过程线。

### $p-v$ 图斜率

$$pv^n = \text{常数} \quad \text{两边取对数}$$

$$\lg(pv^n) = \text{常数} \Rightarrow \lg p + n \lg v = \text{常数}$$

取微分后变形：

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n = -n \frac{p}{v}$$

### $T-s$ 图斜率

$$\delta q = T ds \quad \delta q = c_n dT$$

两式联立求解

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n &= \frac{T}{c_n} \\ &= \frac{n-1}{(n-k)c_v} T \end{aligned}$$



## 理想气体可逆多变过程 (polytropic process) 方程式

基本热力过程的状态参数间满足：

$$pv^n = \text{常数} \quad p_1 v_1^n = p_2 v_2^n \quad 1$$

满足这样关系式的可逆过程称为多变过程； $n$  为常数，称为多变指数。

$$pv = R_g T$$

$$pv^n = pv \cdot v^{n-1} = R_g T \cdot v^{n-1} = \text{常数} \Rightarrow T v^{n-1} = \text{常数}$$

$$T_1 v_1^{n-1} = T_2 v_2^{n-1} \quad 2$$

$$T v^{n-1} = \text{常数} \Rightarrow T \left(\frac{R_g T}{p}\right)^{\frac{n-1}{n}} = T^n p^{-\frac{n-1}{n}} = \text{常数} \Rightarrow T p^{\frac{n-1}{n}} = \text{常数}$$

$$T_1 p_1^{\frac{n-1}{n}} = T_2 p_2^{\frac{n-1}{n}} \quad 3$$



## 多变指数 $n$ 与多变过程的关系

$$pv^n = \text{常数}$$

$n = \pm\infty$	$v = \text{常数}$	定容过程
$n = 0$	$p = \text{常数}$	定压过程
$n = 1$	$pv = \text{常数}$	定温过程
$n = \kappa$	$pv^\kappa = \text{常数}$	定熵(可逆绝热)过程



## 定容过程的定义

- ◆ 定容过程即比体积保持不变的过程，
- ◆ 是  $n \rightarrow \infty$  时的多变过程。

$$n = \frac{\ln p_2 - \ln p_1}{\ln v_2 - \ln v_1}$$

### 应用背景

- ◆ 汽油机气缸中工质的燃烧过程
- ◆ 高压锅内蒸煮食物过程中在放汽前的加热过程等。

$$n = \pm\infty \quad v_1 = v_2 \quad v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} \quad v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

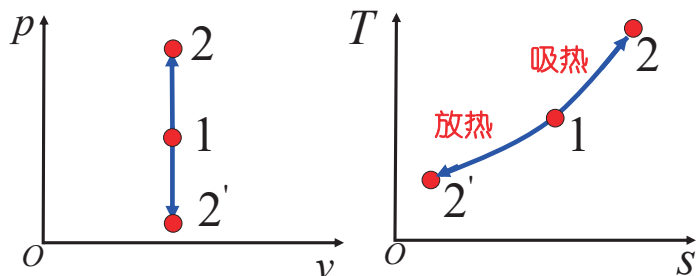
- ◆ 定容过程中气体的压力与热力学温度成正比。



## 定容过程的p-v图及T-S图

$$n \rightarrow \infty$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n = -n \frac{p}{v} \rightarrow \pm \infty \quad \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n = \frac{n-1}{(n-k)c_v} T \rightarrow \frac{1}{c_v} T$$



## 定压过程的定义

- 定容过程即压力保持不变的过程，是  $n = 0$  时的多变过程。

$$n = \frac{\ln p_2 - \ln p_1}{\ln v_2 - \ln v_1}$$

### 应用背景

- 工业中的加热器，冷却器，燃烧器，锅炉等设备；
- 空调中制冷剂在蒸发器中的汽化过程等。

$$n = 0 \quad p_1 = p_2 \quad p_1 = \frac{R_g T_1}{v_1} \quad p_2 = \frac{R_g T_2}{v_2} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

- 定压过程中气体的比体积与热力学温度成正比。



## 定压过程的过程量计算

热能学能变化	$\Delta u = c_v \Big _{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$
焓变	$\Delta h = c_p \Big _{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$
熵变	$\Delta s = \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} \Rightarrow \Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$
过程功	$w = p(v_2 - v_1)$
技术功	$w_t = -\int_1^2 v dp = v(p_1 - p_2) = 0$
过程热量	$q_p = \Delta h + w_t = \Delta h = c_p \Big _{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$



## 定容过程的过程量计算

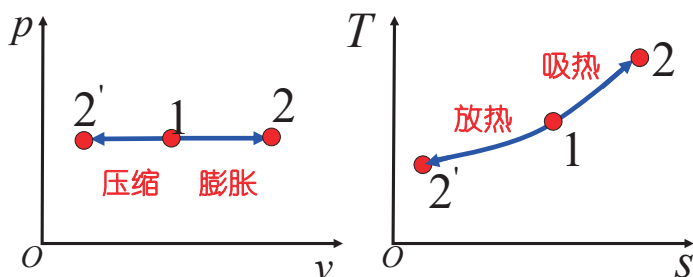
热能学能变化	$\Delta u = c_v \Big _{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$
焓变	$\Delta h = c_p \Big _{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$
熵变	$\Delta s = \int_1^2 c_v \frac{dT}{T} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1} \Rightarrow \Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$
过程功	$w = \int_1^2 p dv = 0$
技术功	$w_t = -\int_1^2 v dp = v(p_1 - p_2)$
过程热量	$q_v = \Delta u + w = \Delta u = c_v \Big _{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1)$



## 定压过程的p-v图及T-S图

$$n = 0$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n = -n \frac{p}{v} = 0 \quad \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n = \frac{n-1}{(n-\kappa)c_v} T = \frac{1}{\kappa c_v} T = \frac{1}{c_p} T$$



## 定温过程的定义

- 定温过程即工质状态变化时温度保持不变的过程，是  $n = 1$  时的多变过程。

### 应用背景

- 冰箱内制冷剂的汽化吸热过程；
- 锅炉内水的定压汽化过程等。

$$n = 1 \quad T_1 = T_2 \quad T_1 = \frac{p_1 v_1}{R_g} \quad T_2 = \frac{p_2 v_2}{R_g} \Rightarrow p_1 v_1 = p_2 v_2$$

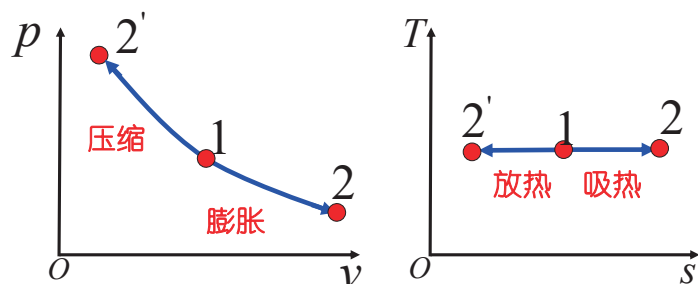
- 定温过程中气体的压力与比体积成反比。



## 定温过程的p-v图及T-S图

$$n = 1$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n = -n \frac{p}{v} = -\frac{p}{v} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n = \frac{n-1}{(n-k)c_v} T = 0$$



## 定温过程的过程量计算

热能学能变化	$\Delta u = c_v \left _{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1) = 0\right.$
焓变	$\Delta h = c_p \left _{T_1}^{T_2} (T_2 - T_1) = 0\right.$
熵变	$\Delta s = \int_1^2 c_v \frac{dT}{T} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1} \Rightarrow \Delta s = R_g \ln \frac{v_2}{v_1} = -R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$
过程功	$w = \int_1^2 p dv = \int_1^2 \frac{pv}{v} dv = R_g T_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$
技术功	$w_t = -\int_1^2 v dp = -\int_1^2 \frac{vp}{p} dp = -R_g T_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = R_g T_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$
过程热量	$q = \Delta u + w = \Delta h + w_t \Rightarrow q = w = w_t$



## 绝热过程的定义

- 绝热过程即状态变化的任何一个微单元过程中，系统和外界都不交换热量的过程。

### 应用背景

- 内燃机气缸内工质进行的膨胀过程和压缩过程；
- 汽轮机和燃气轮机喷管内气体的膨胀过程等。

$$ds = \frac{\delta q_{rev}}{T} \quad \text{可逆绝热时, } \delta q_{rev} = 0$$

$$ds = 0 \quad s = \text{定值}$$

- 可逆绝热过程又称为定熵过程。



## 绝热过程的过程方程式

$$\delta q = c_v dT + p dv \quad \delta q = c_p dT - v dp \quad \delta q = 0$$

$$\frac{dp}{p} = -\frac{c_p}{c_v} \frac{dv}{v} \quad \frac{c_p}{c_v} = \gamma \quad \text{设比热容为定值}$$

$$\frac{dp}{p} + \gamma \frac{dv}{v} = 0$$

$$\ln p + \gamma \ln v = \text{定值} \quad pv^\gamma = \text{定值} \Rightarrow pv^\kappa = \text{定值}$$

- 理想气体的定熵指数(绝热指数)  $\kappa$  等于比热容比，恒大于1。



## 绝热过程的初终态参数的关系

$$pv^\kappa = \text{定值}$$

$$p_2 v_2^\kappa = p_1 v_1^\kappa \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

- 若温度变化幅度较大，采用平均定熵指数  $\kappa_{av}$  来代替  $\kappa$ 。

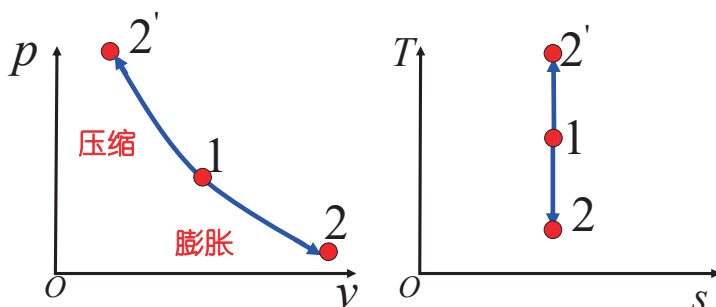
$$\kappa_{av} = \frac{c_p \left|_{T_1}^{T_2}\right.}{c_v \left|_{T_1}^{T_2}\right.} \quad \kappa_{av} = \frac{\kappa_1 + \kappa_2}{2}$$



## 绝热(定熵)过程的p-v图及T-S图

$$n = \kappa$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n = -n \frac{p}{v} = -\kappa \frac{p}{v} \quad \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n = \frac{n-1}{(n-\kappa)c_v} T \rightarrow \infty$$





## 绝热(定熵)过程的过程量计算

热能学能变化	$\Delta u = c_v \left  \frac{T_2}{T_1} \right  (T_2 - T_1)$
焓变	$\Delta h = c_p \left  \frac{T_2}{T_1} \right  (T_2 - T_1)$
熵变	$\Delta s = 0$
过程功	$q = \Delta u + w = 0 \Rightarrow w = -\Delta u = c_v (T_1 - T_2) = \frac{1}{\kappa - 1} R_g (T_1 - T_2)$
技术功	$q = \Delta h + w_t = 0 \Rightarrow w_t = -\Delta h = c_p (T_1 - T_2) = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_g (T_1 - T_2)$
过程热量	$q = 0$



## 多变过程线-p-v图

定容过程:

$$n = \pm \infty \quad \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_n = \mp \infty$$

定压过程:

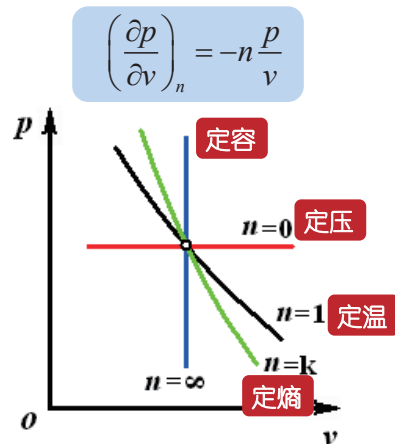
$$n = 0 \quad \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_n = 0$$

定温过程:

$$n = 1 \quad \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_n = -\frac{p}{v}$$

定熵过程:

$$n = \kappa \quad \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_n = -\kappa \frac{p}{v}$$



## 多变过程线-T-s图

定容过程:

$$n = \pm \infty \quad \left( \frac{\partial T}{\partial s} \right)_n = \frac{T}{c_n}$$

定压过程:

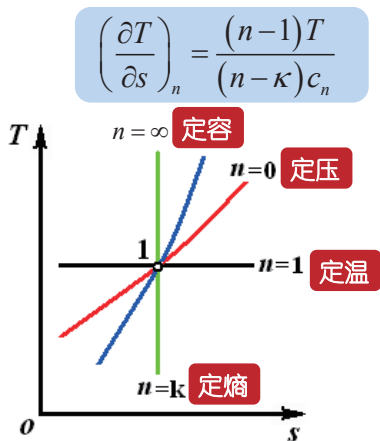
$$n = 0 \quad \left( \frac{\partial T}{\partial s} \right)_n = \frac{T}{\kappa c_n}$$

定温过程:

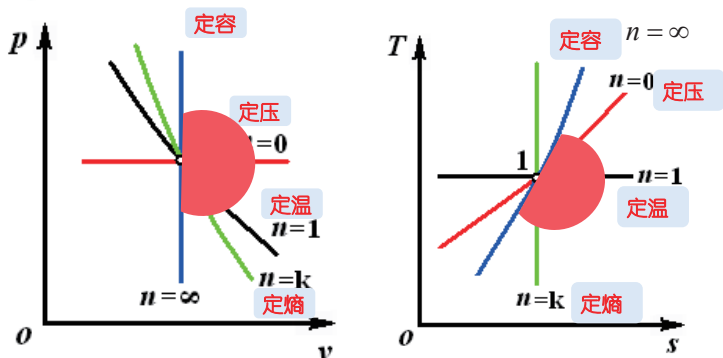
$$n = 1 \quad \left( \frac{\partial T}{\partial s} \right)_n = 0$$

定熵过程:

$$n = \kappa \quad \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_n \rightarrow \infty$$



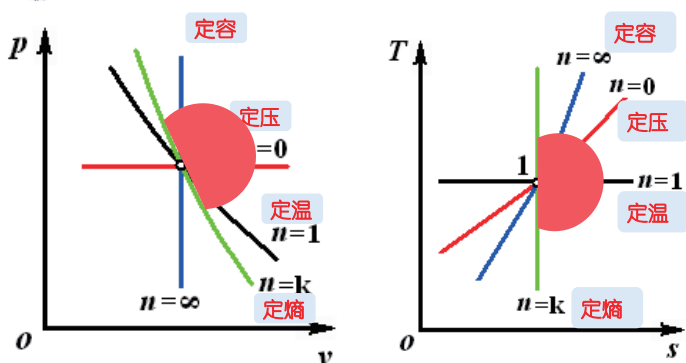
## 多变过程线-过程功(以定容线为界)



◆ 过程功的正负以**定容线**为界, 定容线**右侧**(*p-v*图)或者**右下区域**(*T-s*图)的各过程线  $w > 0$ , 工质膨胀对外做功。反之,  $w < 0$ , 工质被压缩消耗外功。



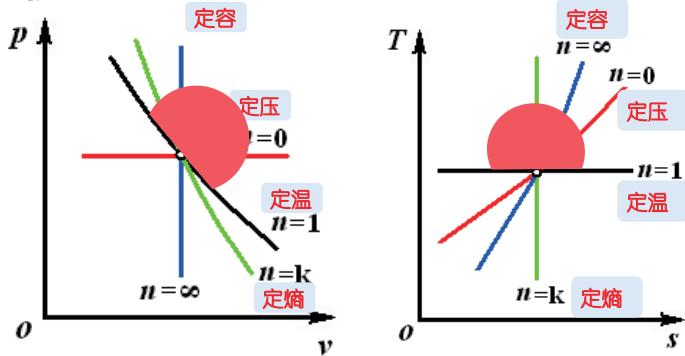
## 多变过程线-过程热量(以定熵线为界)



◆ 过程热量的正负以**定熵线**为界, 定熵线**右侧**(*T-s*图)或者**右上区域**(*p-v*图)的各过程线  $\Delta s > 0, q > 0$ , 工质吸热。反之,  $\Delta s < 0, q < 0$ , 工质放热。



## 多变过程线-热力学能(焓)(以定温线为界)



◆ 热力学能(焓)的增减以**定温线**为界, 定温线**上侧**(*T-s*图)或者**右上区域**(*p-v*图)的各过程线  $\Delta u > 0, \Delta h > 0$ 。反之,  $\Delta u < 0, \Delta h < 0$ 。



## 4-2

### 气体热力过程的功和热量



### 多变过程的过程量计算方法

热能学能变化	$\Delta u = c_v \Big _{t_1}^{t_2} \Delta T$
焓变	$\Delta h = c_p \Big _{t_1}^{t_2} \Delta T$
熵变	$\Delta s_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$
过程功	$w = \int_1^2 p dv$
技术功	$w_t = - \int_1^2 v dp$
过程热量	$q = \Delta u + w \quad q = \Delta h + w_t$



#### 理想气体可逆多变过程方程式-过程功①

$$w = \int_1^2 p dv = p_1 v_1^n \int_1^2 \frac{dv}{v^n} = p_1 v_1^n \int_1^2 v^{-n} dv$$

$$\int x^a dx = \frac{1}{a+1} x^{a+1} + C$$

$$w = p_1 v_1^n \frac{v_2^{1-n} - v_1^{1-n}}{1-n} = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$



#### 理想气体可逆多变过程方程式-过程功②

$$w = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{1}{n-1} R_g (T_1 - T_2)$$

$$R_g = c_p - c_v = \gamma c_v - c_v = (\gamma - 1) c_v$$

◆ 定义：绝热指数(定熵指数)  $\kappa$

理想气体的绝热指数等于其比热容比。即  $\kappa = \gamma$

$$R_g = (\kappa - 1) c_v \quad w = \frac{\kappa - 1}{n - 1} c_v (T_1 - T_2)$$



#### 理想气体可逆多变过程方程式-过程功③

$$w = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{1}{n-1} R_g (T_1 - T_2)$$

$$T_1 p_1^{\frac{n-1}{n}} = T_2 p_2^{\frac{n-1}{n}} \Rightarrow T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

$$w = \frac{1}{n-1} R_g T_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$



#### 理想气体可逆多变过程方程式

过程功

$$w = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

$$w = \frac{1}{n-1} R_g (T_1 - T_2)$$

$$w = \frac{1}{n-1} R_g T_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

技术功

$$w_t = \frac{n}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

$$w_t = \frac{n}{n-1} R_g (T_1 - T_2)$$

$$w_t = \frac{n}{n-1} R_g T_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

◆ 技术功是过程功的  $n$  倍。



## 多变过程比热容

多变过程的**热量**

$$q = \Delta u + w = c_v (T_2 - T_1) + \frac{\kappa - 1}{n - 1} c_v (T_1 - T_2) = \frac{n - \kappa}{n - 1} c_v (T_2 - T_1)$$

引入多变过程比热容的概念

$$q = c_n (T_2 - T_1)$$

多变过程比热容

$$c_n = \frac{n - \kappa}{n - 1} c_v$$

◆  $n$ 取各种特定值时, 即可得到基本热力过程的各种关系。



## 过程能量转换规律

$$w = \frac{\kappa - 1}{n - 1} c_v (T_1 - T_2) \quad \rightarrow \quad \frac{w}{q} = \frac{\kappa - 1}{\kappa - n}$$

$$q = \frac{n - \kappa}{n - 1} c_v (T_2 - T_1)$$

◆ 因定熵指数  $\kappa > 1$  (why?), 因而  $w/q$  取决于  $n$  与  $\kappa$  的关系。



## 过程能量转换规律- $n < \kappa$ 的多变过程

◆  $n < \kappa$  的多变过程

$$\frac{w}{q} = \frac{\kappa - 1}{\kappa - n} > 0 \quad \text{w与q正负相同。}$$

若是膨胀过程, 必须对气体加热; 若是压缩过程, 气体必定对外放热。

若  $1 < n < \kappa$  则

$$\frac{w}{q} = \frac{\kappa - 1}{\kappa - n} > 1$$

则  $w$  与  $q$  不仅同号, 而且,  $|w| > |q|$ , 即输出的膨胀功大于气体的吸热量。据能量守恒定律, 气体**吸热的同时, 温度降低**。

反之, 若  $n < 1$ , 则消耗的压缩功大于气体的放热量, **放热时温度升高**。



## 过程能量转换规律- $n > \kappa$ 的多变过程

◆  $n > \kappa$  的多变过程

$$\frac{w}{q} = \frac{\kappa - 1}{\kappa - n} < 0 \quad \text{w与q正负相反。}$$

膨胀过程, 气体对外放热; 压缩过程, 气体对外吸热。

Thank you!

